

MANUAL DE AYUDA DEL PROGRAMA DE CÁLCULO BÁSICO DE INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS AISLADAS

1.- INTRODUCCIÓN

La entrada en vigor del Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE), establece que ciertos edificios destinados a determinados usos incorporarán sistemas de captación y transformación de energía solar por procedimientos fotovoltaicos cuando superen los siguientes límites:

Tipo de uso	Límite de aplicación
Hipermercado	5.000 m ² construidos
Multitienda y centros de ocio	3.000 m ² construidos
Nave de almacenamiento	10.000 m ² construidos
Administrativos	4.000 m ² construidos
Hoteles y hostales	100 plazas
Hospitales y clínicas	100 camas
Pabellones de recintos feriales	10.000 m ² construidos

Por otro lado, hay que considerar que la gran extensión territorial de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, hace muy difícil que las infraestructuras eléctricas convencionales lleguen a todos los rincones de la misma, erigiéndose los sistemas solares fotovoltaicos para autoabastecimiento como una forma eficaz, limpia y respetuosa con el medio ambiente, de generar energía allí donde no llega el abastecimiento convencional.

El presente programa de cálculo se ha desarrollado con el fin de proporcionar a promotores, constructores, arquitectos, ingenierías, proyectistas, instaladores, técnicos de las administraciones, administradores de fincas y a los propios usuarios una herramienta básica de dimensionado y comprobación del funcionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas para autoconsumo de energía eléctrica.

2.- CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

Este programa se ha desarrollado con el fin de permitir el dimensionado de los componentes de una instalación solar fotovoltaica que garantice el suministro de energía eléctrica de los consumos a los que abastece.

El procedimiento básico de dimensionado se divide en tres partes fundamentales:

- Estimación de la demanda de energía: El programa permite la introducción de los valores de demanda de energía eléctrica, si estos son conocidos, o guía al usuario en la estimación, si son desconocidos.

Descripción	Potencia (W)		Tiempo de uso
	CA	CC	(hora/día)
Iluminación de dormitorio	20	13	1
Iluminación de cuarto de baño	20	13	2
Iluminación cocina	20	13	3
Iluminación salón	40	13	7
Lavadora	1600		0,5
Lavadora en frío	300		0,2
Lavavajillas	1600		1
Frigorífico	100		24
Microondas	850		1
Vitrocerámica	3000		1
Plancha	1500		1
Aspirador	1500		0,5
Pequeños electrodomésticos	300		1
Televisor	45-90		4
Equipo Hi-Fi	150		1
Vídeo	90		1
Ordenador	100		1

- Evaluación de la energía solar disponible, utilizando los datos climatológicos para distintas provincias y localidades de Castilla y León.

A partir de dichos datos, el programa determina la potencia del campo generador fotovoltaico y del resto de los equipos de la instalación solar. El cálculo de la instalación vendrá dado por la relación entre la demanda de energía del sistema y la energía que puede aportar el sol.

El método de cálculo especifica, para cada mes, los valores medios de:

- Demanda energética

- Aportación del sistema solar
- Rendimiento de la instalación

Asimismo, especifica las prestaciones globales anuales y proporciona la demanda de energía anual, la energía solar aportada total anual y la aportación renovable media anual (%).

3.- MÉTODO DE CÁLCULO

3.1.- Evaluación de la demanda energética

La demanda eléctrica media total diaria vendrá dada por la suma de los consumos medios diarios de corriente alterna y continua, para cada mes del año, teniendo en cuenta los rendimientos tanto del regulador como del inversor, por lo tanto:

$$Ed = \left(\frac{E_{cc}}{\eta_{reg}} + \frac{E_{ac}}{\eta_{reg} \cdot \eta_{inv}} \right)$$

donde:

Ed = Consumo eléctrico medio diario total (en Wh/día).

E_{cc} = Consumo eléctrico medio diario en corriente continua (en Wh/día).

E_{ac} = Consumo eléctrico medio diario en corriente alterna (en Wh/día).

η_{reg} = Rendimiento del regulador en tanto por uno. Se estima un valor medio de 0,98.

η_{inv} = Rendimiento del inversor en tanto por uno. El rendimiento mínimo del inversor variará entre 0,7 y 0,85, en función del tipo de inversor y carga a la que está trabajando.

En el caso de que los consumos medios diarios se desconozcan, habrán de ser estimados:

- El consumo eléctrico medio diario en corriente continua vendrá dado por la siguiente expresión:

$$E_{cc} = \sum_i n_i \cdot P_{cc_i} \cdot h_i$$

donde:

E_{cc} = consumo medio diario de energía en corriente continua, en Wh/día.

n_i = número de unidades del equipo “i”.

P_{cc_i} = potencia del equipo “i” de corriente continua, en W.

h_i = horas de utilización diaria del equipo “i”.

- El consumo eléctrico medio diario en corriente alterna vendrá dado por la siguiente expresión:

$$E_{ca} = \sum_i n_i \cdot P_{ca_i} \cdot h_i$$

donde:

E_{ca} = consumo medio diario de energía en corriente alterna, en Wh/día.

n_i = número de unidades del equipo “i”.

P_{ca_i} = potencia del equipo “i” de corriente alterna, en W.

h_i = horas de utilización diaria del equipo “i”.

- El consumo eléctrico medio de un equipo de bombeo en una instalación fotovoltaica para bombeo directo se define como la energía necesaria para desplazar el volumen diario de agua requerido (V) hasta cierta altura (h), y viene dado por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V}{3.600} = 2,725 \cdot h \cdot V$$

donde:

E = la energía diaria necesaria para el bombeo (Wh/día), bien en corriente continua (equivalente a E_{cc}) o en corriente alterna (equivalente a E_{ca})

ρ = Densidad del agua en kg/litro, con un valor aproximado a la unidad.

g = Aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m/s}^2$.

h = Es la diferencia de altura, en metros, entre el nivel de descarga de la tubería de impulsión en el depósito y el nivel estático del agua del pozo. Se han considerado despreciables las pérdidas por fricción en las tuberías y la variación del nivel dinámico del agua durante el bombeo.

V = Volumen diario de agua a bombear en m^3 .

La potencia mínima de la bomba en sistemas fotovoltaicos para bombeo directo, conociendo las horas diarias de funcionamiento de la bomba (t en horas), viene dada por la expresión siguiente:

$$P_e = \frac{P}{\eta} = \frac{2,725 \cdot h \cdot V}{t \cdot \eta}$$

donde:

P = Potencia mecánica necesaria de la bomba.

η = Eficiencia de la bomba.

h = Diferencia de altura, en metros, entre el nivel de descarga de la tubería de impulsión en el depósito y el nivel estático del agua del pozo.

V = volumen diario de agua a bombear en m³.

t = horas de sol pico del mes de cálculo para la inclinación y orientación seleccionadas.

Así pues, la demanda eléctrica total anual se calculará según la siguiente expresión:

$$Ed_{\text{anual}} = \frac{1}{1000} \sum_{\text{Enero}}^{\text{Diciembre}} Ed_{\text{mes}} * N_{\text{mes}}$$

siendo:

Ed_{anual} = Consumo eléctrico total anual (en kWh).

Ed_{mes} = Consumo eléctrico medio diario de cada mes (en Wh/día), calculado según la fórmula anterior.

N_{mes} = Número de días de cada mes del año.

3.2.- Evaluación del aporte solar

Para evaluar la energía solar aportada es necesario conocer la radiación solar incidente por m² de módulo fotovoltaico, según su orientación y ángulo de inclinación respecto a la horizontal en el que vaya a ser instalado.

La orientación ha de ser hacia el sur, al maximizar el compute de la radiación solar anual. Esta orientación podrá variarse por causas especiales como la existencia de sombras, falta de espacio o integración arquitectónica.

Se considera, como norma general, que la inclinación del panel ha de coincidir con la latitud del lugar, si bien la inclinación más idónea depende de las condiciones de utilización de la instalación, pudiendo darse los siguientes casos:

- Utilización en invierno: 10° mayor que la latitud.
- Utilización uniforme a lo largo del año: igual que la latitud.
- Utilización en verano: 10° menor que la latitud.

3.3.- Cálculo de la instalación fotovoltaica aislada

Con los datos obtenidos en los apartados anteriores, se conoce para cada mes las necesidades energéticas y la energía disponible por aporte solar de la instalación solar.

Como la cobertura energética, en principio, debe quedar garantizada durante el periodo de utilización de la instalación, aquel en el que existe consumo eléctrico, es necesario tomar como base de cálculo de la instalación el mes más desfavorable de dicho periodo.

Se entiende como mes más desfavorable del año, aquel en que el cociente entre la energía disponible por aporte solar y las necesidades de energía alcance el valor más pequeño, siempre y cuando exista consumo de energía.

Para la obtención del mes más desfavorable, se calcula para cada mes del periodo de utilización de la instalación, el cociente entre el consumo de energía (E_d) y la energía disponible (radiación solar media diaria sobre el plano del captador). La instalación se dimensionará para el mes en que este cociente resulte más alto.

Determinación de la potencia pico del campo generador fotovoltaico.

La potencia pico del campo fotovoltaico se establecerá como el consumo eléctrico medio total diario y la cobertura de la instalación solar prevista, partido por el producto de las horas de sol pico y el rendimiento medio del módulo, tomando en consideración que estos valores corresponderán a los del mes de cálculo anteriormente determinado.

La expresión matemática se correspondería con:

$$P_{p_{\text{generador}}} = \frac{E_d \cdot \alpha}{\eta_{\text{módulo}} \cdot HPS_{\beta} \cdot 100}$$

donde:

$P_{p_{\text{generador}}}$ = Potencia pico del campo generador en Condiciones Estándar de Medida (CEM), en Wp.

$\eta_{\text{módulo}}$ = Rendimiento medio del módulo fotovoltaico. Se puede tomar un valor de 0,85.

HPS_{β} = Horas Pico Solar para un ángulo de inclinación β , para el mes de cálculo determinado anteriormente.

E_d = Energía media diaria consumida en Wh/m²día en el mes de cálculo.

α = Cobertura de la instalación solar en tanto por ciento: como en estas instalaciones se intenta cubrir toda la demanda, la cobertura debería ser del 100%. Sin embargo, por cuestiones de seguridad en el suministro dicho valor puede incrementarse en un 20%.

Por otro lado, existen situaciones en las que la utilización de otros equipos de

generación de energía (generadores diesel, aerogeneradores, etc.), permiten reducir el valor de la cobertura de la instalación solar.

Se elegirá el número de paneles fotovoltaicos, de acuerdo con su potencia pico y voltaje de trabajo, dependiente del regulador e inversor seleccionados, necesarios para proporcionar la potencia calculada del campo de paneles, redondeándose el resultado del cálculo anterior al número de módulos inmediatamente superior.

En cuanto al conexionado de los módulos que forman el campo de generación fotovoltaico, estos se agrupan en ramas, dentro de las cuales los módulos se conectan en serie para conseguir la tensión nominal del campo fotovoltaico. Por otra parte, las ramas se agrupan en paralelo para formar el campo generador.

El cálculo del número de módulos fotovoltaicos en serie (Nº módulos / rama fv) que componen cada rama, viene dado por la expresión:

$$\text{Nº módulos / rama fv} = \frac{V_n}{V_{n\text{módulo}}}$$

donde:

V_n = Tensión nominal del campo fotovoltaico en Voltios

$V_{n\text{ módulo}}$ = Tensión nominal de los módulos fotovoltaicos en Voltios.

El número de ramas fotovoltaicas que se conectan en paralelo (Nº ramas fv) se calculará con una de las siguientes expresiones según el caso:

- Caso 1º: La tensión nominal del campo generador fotovoltaico es igual a la tensión nominal de módulo fotovoltaico:

$$\text{Nº ramas fv} = \text{Parte entera} \left(\frac{P_{p\text{ generador}}}{P_{p\text{ módulo}}} \right) + 1$$

- Caso 2º: La tensión nominal del campo generador fotovoltaico es mayor que la tensión nominal del módulo fotovoltaico:

★ Si $\left(\frac{P_{p\text{ generador}}}{P_{p\text{ módulo}}} \right)$ es múltiplo entero de $\frac{V_n}{V_{n\text{ módulo}}}$, el número de ramas fotovoltaicas viene dado por la expresión:

$$N^{\circ} \text{ ramas fv} = \text{Parte entera} \left[\frac{\frac{Pp_{\text{generador}}}{Pp_{\text{módulo}}}}{\frac{Vn}{Vn_{\text{panel}}}} \right]$$

* Si $\left(\frac{Pp_{\text{generador}}}{Pp_{\text{módulo}}} \right)$ no es múltiplo entero de $\frac{Vn}{Vn_{\text{módulo}}}$:

$$N^{\circ} \text{ ramas fv} = \text{Parte entera} \left[\frac{\frac{Pp_{\text{generador}}}{Pp_{\text{módulo}}}}{\frac{Vn}{Vn_{\text{panel}}}} \right] + 1$$

donde:

$Pp_{\text{generador}}$ = Potencia pico del campo de módulos fotovoltaicos en Wp.

$Pp_{\text{módulo}}$ = Potencia pico del módulo fotovoltaico en Wp en Condiciones Estándar de Medida, según datos del fabricante.

Vn = Tensión nominal del campo fotovoltaico en Voltios

$Vn_{\text{módulo}}$ = Tensión nominal de los módulos fotovoltaicos en Voltios.

El número de módulos fotovoltaicos, de acuerdo con su potencia pico y voltaje de trabajo, necesarios para proporcionar la potencia pico calculada del campo de módulos, se realiza multiplicando el número de ramas del campo fotovoltaico de generación y el número de módulos por rama, según la expresión:

$$N^{\circ} \text{ módulos} = N^{\circ} \text{ módulos / rama fv} \times N^{\circ} \text{ ramas fv}$$

donde:

$N^{\circ} \text{ módulos / rama fv}$ = Número de módulos fotovoltaicos en serie que componen cada rama del campo fotovoltaico.

$N^{\circ} \text{ ramas fv}$ = número de ramas que se conectan en paralelo.

Por lo tanto la potencia pico del campo de generación fotovoltaico se obtiene como el producto del número de módulos del campo fotovoltaico y la potencia pico del módulo fotovoltaico seleccionado según la expresión:

$$Pp_{\text{generador final}} = N^{\circ} \text{ de módulos} * Pp_{\text{módulo}}$$

Determinación de la capacidad de acumulación.

La capacidad nominal del campo de baterías, referida a C_{100} , se obtendrá como el producto de los días de autonomía seleccionados y el consumo total diario (del mes de cálculo) mayorado en un 10 %, dividido por el voltaje del regulador y la profundidad de descarga máxima de la batería.

Matemáticamente dicha expresión se correspondería con:

$$C_{\text{total}} = \frac{1,1 \cdot E_d \cdot A}{P_{d_{\text{max}}} \cdot V_n} \text{ (Ah)}$$

donde:

C_{total} = Capacidad nominal del campo de baterías referida a C_{100} , en Ah.

E_d = Consumo medio total diario del mes de cálculo en Wh/día.

A = Autonomía de la instalación solar en días.

$P_{d_{\text{max}}}$ = Máxima profundidad de descarga permitida, en tanto por uno.

V_n = Tensión nominal del campo fotovoltaico, en voltios.

El número de baterías del sistema de acumulación vendrá dado por la relación entre la capacidad nominal total de sistema de acumulación y la capacidad nominal C_{100} de la batería o elemento seleccionado (en el caso de seleccionar baterías formadas por elementos), según la expresión:

$$\text{Nº Baterías} = \frac{C_{\text{total}}}{C_{100}}$$

donde:

Nº de baterías = Número de baterías en paralelo del sistema de acumulación.

C_{total} = Capacidad total del sistema de acumulación de la instalación solar fotovoltaica aislada.

C_{100} = Capacidad nominal a C_{100} de la batería o elemento de batería seleccionado.

El número de elementos que componen una batería se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Nº elementos / baterías} = \frac{V_n}{V_{n_{\text{batería}}}}$$

donde:

V_n = Tensión nominal de la instalación en Voltios
 $V_{n_{batería}}$ = Tensión nominal del elemento en Voltios

Se ha de reseñar que en el caso de baterías monoblock los elementos suelen de 12V, es decir, la propia batería se puede considerar como un elemento. En el caso de baterías estacionarias, los elementos pueden ser de 2, 6 o 12 voltios, siendo lo más habitual que dichos elementos sean de 2 V.

Determinación de las características del sistema de regulación.

Para un regulador de intensidad dada, el máximo número de ramas por regulador se obtiene mediante la expresión:

$$N^{\circ} \text{ ramas / regulador} = \text{Parte entera} \left(\frac{I_{\text{regulador}}}{I_{m_{\text{módulo}}}} \right)$$

donde:

$N^{\circ} \text{ ramas / regulador}$ = máximo número de ramas del campo fotovoltaico conectadas al regulador seleccionado.

$I_{\text{regulador}}$ = intensidad nominal del regulador.

$I_{m_{\text{módulo}}}$ = intensidad en el punto de máxima potencia del módulo fotovoltaico seleccionado.

Así pues, el número de reguladores necesarios en la instalación fotovoltaica vendrá dada por la expresión:

$$N^{\circ} \text{ de reguladores} = \text{Parte entera} \left(\frac{N^{\circ} \text{ ramas fv}}{N^{\circ} \text{ ramas / regulador}} \right) + 1$$

donde:

$N^{\circ} \text{ de reguladores}$ = número de reguladores de la instalación solar fotovoltaica

$N^{\circ} \text{ ramas fv}$ = Número de ramas del campo fotovoltaico.

$N^{\circ} \text{ ramas/regulador}$ = Número máximo de ramas conectado a cada regulador.

El cálculo del número de inversores de la instalación fotovoltaica aislada viene determinado por la máxima potencia simultanea demandada , de forma que el número de inversores vendrá dado por la expresión:

$$\text{Nº de inversores} = \text{Parte entera} \left(\frac{\text{Máxima potencia simultánea demandada}}{\text{Potencia nominal inversor}} \right) + 1$$

donde:

Nº de inversores = Número de inversores necesarios en la instalación solar fotovoltaica
Máxima potencia simultánea demandada = demanda máxima de potencia, en vatios, de la instalación de consumo.

4.- APLICACIONES

El presente programa se ha desarrollado para dimensionar los componentes de una instalación fotovoltaica para autoconsumo y ayudar al usuario a comprobar el funcionamiento de su instalación solar fotovoltaica.

Sin embargo, se ha de considerar que el buen funcionamiento de una instalación de estas características está determinada por la elección de los componentes que mejor se adapten a las características de generación y del consumo eléctrico.

Es importante considerar que si la demanda de energía eléctrica de la instalación se concentra en determinados periodos temporales (fines de semana, verano, etc.), el generador fotovoltaico y el sistema de acumulación más apropiados serían mayores o menores que los valores considerados como óptimos por el programa. Por ejemplo, cuando el consumo se concentra en periodos como fines de semana, el generador fotovoltaico puede ser menor (durante el resto de la semana se produciría lo que se va a consumir en esos días) y el sistema de acumulación mayor (acumulamos la mayor cantidad posible de la energía generada en el periodo sin consumo) que el considerado como más apropiado.

Así, el sistema de acumulación en instalaciones fotovoltaicas aisladas cumple una doble misión: por un lado, permite salvar el desfase diario entre la generación (durante el día) y el consumo (por ejemplo, en iluminación nocturna) y por otro proporciona una autonomía (días) que permita disponer de electricidad aún sin existir generación solar.

Por todo ello, el usuario de una instalación de este tipo debe tener presente que la cantidad de energía diaria que puede generar es finita y equivale al consumo de diseño para ese día. Por tanto, si se consume más energía que aquella para la que se dimensionó la instalación, el generador fotovoltaico no será capaz de proporcionar la energía demandada, reduciéndose la almacenada en el sistema de acumulación de tal forma que, de persistir esta situación, se corte el suministro de energía.

Especial cuidado ha de tenerse en la elección del equipo inversor. Dicho equipo, es el que nos transforma la energía eléctrica en corriente continua generada en el campo fotovoltaico y almacenada en las baterías, en corriente eléctrica en corriente alterna, que es la que comúnmente utilizamos.

De la calidad con que este equipo genere dicha corriente alterna (tipo de onda, distorsión armónica, estabilidad de la tensión de salida, etc.) depende el correcto funcionamiento de la mayor parte de los aparatos de consumo habituales.

Como ejemplo, se puede indicar que para aplicaciones tales como iluminación pueden valer inversores de onda senoidal modificada o incluso de onda cuadrada. Sin embargo, un ordenador alimentado mediante un inversor de este tipo, cuando menos, tendrá un mal funcionamiento o se estropeará.

Todo ello, unido al exacto conocimiento por parte del usuario de las prestaciones energéticas de la instalación fotovoltaica y a las tareas de mantenimiento, hará que la instalación funcione correctamente durante muchos años.